

## 一次運動野と背外側前頭前野への経頭蓋直流電気刺激が 持久的運動能力に与える影響

彦坂 幹斗<sup>1) 2)</sup>・荒牧 勇<sup>3)</sup>

### The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation Over the Primary Motor Cortex and the Dorsolateral Prefrontal Cortex on Endurance Performance

Mikito HIKOSAKA, Yu ARAMAKI

#### Abstract

The effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) over the primary motor cortex (M1) for sports performance remains controversial. Some studies indicated that an improvement of motor performance following anodal tDCS over the M1, whereas other studies presented contradictory evidence. It has been suggested that stimulation of not only the M1 but also that of the prefrontal cortex (PFC), a higher-order brain region, may influence the response to tDCS. Considering these results proposed that if M1 excitability is increased, with low PFC excitability, the activation of the entire hierarchical network may not be possible. We, therefore, hypothesized that activation of the entire motor network is more effective in improving motor performance than when only the M1 is activated. In this study, we investigated the effect of concurrent anodal tDCS over the M1 and the left dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) on endurance performance. In this randomized control study, eight healthy male athletes received three different tDCS: A) concurrent anodal tDCS over the M1 and left DLPFC, B) anodal tDCS over the M1 only, and C) sham stimulation. The current was applied for 10 min at intensity of 1.5 mA. After each tDCS session, participants performed a cycling task to exhaustion at 70% of peak power output. We corrected and analyzed the time to exhaustion and physiological and perceptual data during the cycling task. Results indicated that the time to exhaustion and physiological and perceptual parameters between the three different stimulations were not significantly different. Our data suggest that concurrent anodal tDCS over the M1 and left DLPFC does not improve athletes' endurance performance. Here we describe some factors influencing these data, including a ceiling effect in which the motor network has already reached its activation limit. Furthermore, due to certain population attributes the tDCS may not affect athletes' motor performance. Moreover, the effect of tDCS may be concealed by individual variability in response to tDCS and errors associated with performance tasks.

#### I. 緒言

経頭蓋直流電気刺激 (transcranial direct current stimulation: tDCS) は、頭皮上から大脳皮質に対

して微弱な電流を流すことによって、電極直下の大脳皮質の興奮性を一過性に変化させる非侵襲脳刺激法である。刺激電極の極性によって効果が異なり、陽極刺激は大脳皮質の興奮性を促

<sup>1)</sup> 中京大学大学院体育学研究科・<sup>2)</sup> 日本学術振興会特別研究員

<sup>3)</sup> 中京大学スポーツ科学部

通し、陰極刺激は脳皮質の興奮性を抑制する [1, 2]。近年では、tDCS のスポーツパフォーマンス向上効果が注目されており [3-5]、この技術が「ドーピング」に抵触する可能性についても議論されている [6]。そのため、運動能力に対する tDCS の様々な刺激方法による効果の有無や程度、長期利用の安全性を明確に示すことが急務である。しかしながら、現在までの研究では、tDCS がスポーツパフォーマンスを向上させると結論づけることは難しい。なぜなら、tDCS が運動能力を高めるとするポジティブな報告 [7-13] もあれば、刺激効果が観られないとするネガティブな報告 [14-17] もあるからである。

運動能力に対する tDCS の効果の有無が、研究報告により様々である理由として、刺激した脳部位だけではなく、刺激した脳部位と構造・機能的に関連するその他の脳部位の影響が考えられる [11, 18, 19]。脳機能が脳部位間のネットワーク的な活動によって発現していることを考えると、ネットワーク全体の興奮性を考慮する必要があるであろう。tDCS を行った脳部位の興奮性が高まったとしても、その他の脳部位の興奮性が低ければ、ネットワーク全体としての機能発現は十分に期待できない可能性がある。

しかしながら、これまでの tDCS 研究では、単一脳部位への刺激の効果を検討するものが多い。例えば、Angius ら [10] は、一次運動野の下肢領域に対する陽極刺激が持久的運動能力を高めることを示している。同様に、Lattari ら [13] は、左背外側前頭前野に対して陽極刺激を与えることで持久的運動能力が向上することを示している。こうした例が示すように、tDCS が運動能力を向上させるという報告には、随意運動の運動出力に関わる一次運動野へ tDCS によって、その刺激領域が支配する身体部位の運動能力の変化を評価した研究 [7-11] と、運動の企画や動機付けに関わる前頭前野に対する刺激効果を評価した研究 [13, 20] がある。一次運動野と前頭前野は、随意運動を発現する神経機構において、低次と高次の階層性を形成している。このネットワークの階層性により、低次の一次運

動野への tDCS でも、高次の前頭前野への tDCS でも持久的運動能力を向上させる結果が観察されたと考えることができる。だが一方で、これらの領域への tDCS で持久的運動能力が向上しないと示す報告もある [17, 21]。

ここで我々は、随意運動発現機構の階層性を考慮した場合、もし tDCS で一次運動野の興奮性を高めても前頭前野の興奮性が低ければ、運動能力の向上は十分に期待できないのではないかと考えた。そして、そのことが先行研究の tDCS の運動能力向上効果についてのポジティブな結果とネガティブな結果が共存する理由なのではないかと考えた。実際、先行研究では、一次運動野単独への陽極刺激よりも、一次運動野と左背外側前頭前野の両方に同時に tDCS 刺激を実施した条件の方が運動誘発電位の振幅が増大することが報告されている [22]。そこで我々は、一次運動野と前頭前野の二カ所同時刺激が持久的運動能力に与える影響を明らかにし、随意運動発現機構の階層性のネットワーク全体の興奮性を高める tDCS の運動パフォーマンスへの効果について検討する。

## II. 方法

### 1. 研究対象者

健常な成人男性アスリート 8 名（身長：172.4 ± 5.1cm、体重：67.4 ± 3.6kg、年齢：21.9 ± 0.9 歳、短距離選手 7 名、跳躍選手 1 名）は、1 日の事前計測と 3 日間の実験に参加した。研究対象者は、神経疾患の既往歴や下肢の傷害を有していなかった。実験課題の遂行による疲労効果や tDCS の事後効果を取り除くために、事前計測と実験の間や実験と実験の間は少なくとも 72 時間以上空けた。運動パフォーマンスと tDCS の刺激効果の日内変動を避けるために、同一時間帯に実験を行った。事前計測と実験課題の 24 時間前の飲酒と 12 時間前のカフェインの摂取、医薬品の摂取、トレーニングは制限された。事前計測と実験は、ヘルシンキ宣言に則った内容で計画され、研究対象者には口頭と書面にて十分な説明を行い、書面での同意を得た。本研究は、

中京大学体育学研究科倫理委員会の承認（承認番号：2018-29）を得て実施された。

## 2. 事前計測

事前計測では、実験課題の運動強度を決定するために、漸増負荷テストを行った。このテストは、自転車エルゴメーターを使用して100Wの負荷設定で5分間の自転車ペダリングを行い（ウォーミングアップ）、その後30秒経過毎に、10Wずつ負荷を漸増した。なお、ペダリングの回転数は、60～90回転を維持するように教示し、60回転を5秒以上下回った時点でテストを終了とした。このテスト終了時点までの運動時間と負荷から回帰直線を引き、テスト終了時点での推定運動強度、すなわちPeak power output (PPO) を推定した。

## 3. 実験手順

実験では、まず研究対象者は10分間のtDCS（tDCSの刺激条件設定を参照）を受けた。刺激後、研究対象者は自転車エルゴメーターを使用して100Wで5分間の自転車ペダリング（ウォーミングアップ）を行った。その後、70%PPOの負荷設定でオールアウトするまで漕ぎ続ける疲労困憊ペダリング課題が実施された。ペダリングの回転数は、60～90回転を維持するように教示し、60回転を5秒以上下回った時点でテストを終了とした。この課題の運動パフォーマンス指標として、テスト開始から終了時点までの運動時間をTime to exhaustion (TTE) とした。また、生理的指標として、疲労困憊ペダリング課題実施中の心拍数を心電図式のセンサー（Polar H7）によって計測し、課題前と課題後1、3、5分後の血中乳酸濃度をラクテートスカウター（LT-1730）によって計測した。さらに、知覚的指標として、研究対象者は疲労困憊ペダリング課題開始から1分経過毎にBorgスケールに基づいた15段階の主観的運動強度（Rating of perceived exertion: RPE）と下肢に生じる痛みについて0～10の数値的評価尺度（Numerical rating scale: NRS）に回答した。

## 4. tDCSの刺激条件設定

tDCSは、バッテリー駆動のDC電気刺激装置を2台使用した。一次運動野への刺激にはNeuroConn社の装置（DC-Stimulator）、左背外側前頭前野への刺激にはSoterix Medical社の装置（1×1 tES）を使用した。一次運動野へのtDCSとして、10-20電極配置法におけるCz領域と、右肩にそれぞれ電極を配置した。左背外側前頭前野へのtDCSとして、10-20電極配置法におけるF3領域と、左肩にそれぞれ電極を配置した。これらの刺激について、一次運動野への刺激には5×5 cm、左背外側前頭前野への刺激には5×4 cmのゴムの導電性電極に生理食塩水を浸したスポンジカバーを被せて、1.5 mAで10分間刺激した。シャム刺激については、刺激開始から30秒以降は電流が流れないように設定した。刺激条件として、A)一次運動野と左背外側前頭前野の両方に同時に陽極刺激を与える条件（M1-陽極×DLPFC-陽極）、B)一次運動野に陽極刺激、左背外側前頭前野にシャム刺激を与える条件（M1-陽極×DLPFC-シャム）、C)一次運動野と左背外側前頭前野の両方にシャム刺激を与える条件（M1-シャム×DLPFC-シャム）を設定した。実験は、プラセボ効果を防ぐために二重盲検法を用い、カウンターバランスが取れるように刺激条件の順番を計画した。刺激中は座位で安静をとり、「可能な限り何も考えないように」と教示した。

## 5. データ処理

疲労困憊ペダリング課題実施中の心拍数について、2試行でデータが欠損していた。これらの欠損値に対して、各試行の30秒間の移動平均によって欠損値を補完した。疲労困憊ペダリング課題実施中の心拍数とRPE、NRSについては、各試行でTTEが異なることからデータ数が統一されていない。そのため、これらのデータ解析については、全試行で記録することができた6分間までの運動時間を解析区間とした。疲労困憊ペダリング課題実施中の心拍数のデータは、課題開始から1分経過毎の値を毎分の後半30秒の平均値を算出した。血中乳酸濃度について

ては、1、3、5分後のデータから最大値をピーク血中乳酸濃度とした。すべてのデータは平均値±標準偏差で示した。

## 6. 統計解析

まず、3日間の実験セッションにわたる運動パフォーマンスの日間変動について確認するため、TTEの測定値については、実験セッションを独立変数とした反復測定一元配置分散分析を行った。次に、tDCSの刺激効果について確認するため、TTEとピーク血中乳酸濃度に対して、刺激条件を独立変数とした反復測定一元配置分散分析を行った。心拍数とRPE、NRSについては、刺激条件と運動時間を独立変数とした、反復測定二元配置分散分析を行った。なお、球面性の仮定が成り立たなかった場合、Green-house Geisserによって補正された自由度から算出したF値を採用した。これらの解析によって、交互作用または、主効果が有意であった場合は、下位検定として、Bonferroni法によって補正された多重比較検定を行った。有意水準は5%未満とした。統計処理には、SPSS ver. 23を用いた。

## Ⅲ. 結果

### 1. 事前計測と実験の信頼性

すべての研究対象者のPPOは $256 \pm 23$ Wで

あり、疲労困憊ペダリング課題に使用した70%PPOは $179 \pm 16$ Wであった。3日間の実験セッションにわたる日間変動について、反復測定一元配置分散分析の結果、TTEの測定値における実験セッションの主効果は認められなかった ( $F_{(2, 14)} = 0.107, p = 0.899$ )。

### 2. tDCSの刺激効果の検証

各刺激条件におけるTTEについては、図1にまとめた。TTEについては、刺激条件の主効果は認められなかった ( $F_{(2, 14)} = 0.028, p = 0.973$ 、図1)。個人内での刺激効果については、5名の研究対象者がM1-シャム×DLPFC-シャム条件よりもM1-陽極×DLPFC-シャム条件の方がTTEは高く、その内2名はM1-陽極×DLPFC-陽極条件でTTEは更なる高値を示した(図1)。一方で、3名の研究対象者はM1-シャム×DLPFC-シャム条件よりもM1-陽極×DLPFC-シャム条件の方がTTEは低かったが、その中で1名はM1-シャム×DLPFC-シャム条件よりもM1-陽極×DLPFC-陽極条件の方がTTEは大きかった(図1)。疲労困憊ペダリング課題終了後のピーク血中乳酸濃度について、刺激条件の主効果は認められなかった(M1-陽極×DLPFC-陽極、 $11.5 \pm 2.7$ mmol/L; M1-陽極×DLPFC-シャム、 $12.2 \pm 2.5$ mmol/L; M1-シャム×DLPFC-シャム、 $11.0 \pm 2.3$ mmol/L;  $F_{(2, 14)} = 1.21, p = 0.121$ )。

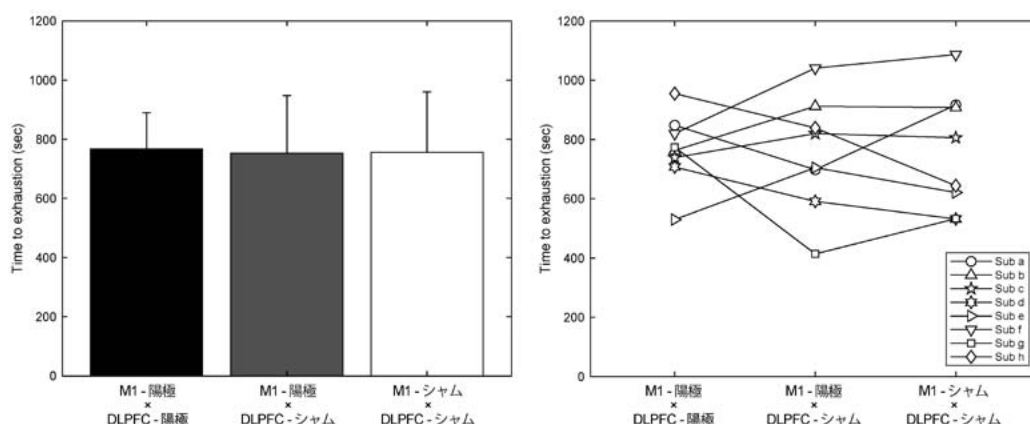


図1 経頭蓋直流電気刺激を実施した後の自転車ペダリング課題の Time to exhaustion. M1、一次運動野; DLPFC、左背外側前頭前野; 平均値±標準偏差

表1 疲労困憊ペダリング課題中の心拍数と主観的運動強度、下肢に生じる痛みの数値的評価尺度

心拍数 (bpm)	時間					
	1分	2分	3分	4分	5分	6分
M1 - 陽極 × DLPFC - 陽極	135 ± 9	152 ± 8	160 ± 10	164 ± 9	168 ± 10	172 ± 11
M1 - 陽極 × DLPFC - シヤム	133 ± 6	150 ± 8	158 ± 7	164 ± 7	168 ± 8	172 ± 8
M1 - シヤム × DLPFC - シヤム	130 ± 11	149 ± 9	156 ± 7	162 ± 7	166 ± 9	170 ± 8
RPE	1分	2分	3分	4分	5分	6分
M1 - 陽極 × DLPFC - 陽極	9 ± 2	10 ± 2	11 ± 2	13 ± 2	14 ± 2	15 ± 2
M1 - 陽極 × DLPFC - シヤム	8 ± 2	10 ± 2	12 ± 2	13 ± 2	15 ± 2	16 ± 2
M1 - シヤム × DLPFC - シヤム	9 ± 2	11 ± 2	12 ± 2	13 ± 2	14 ± 2	16 ± 2
NRS	1分	2分	3分	4分	5分	6分
M1 - 陽極 × DLPFC - 陽極	2 ± 1	4 ± 1	4 ± 2	5 ± 2	6 ± 2	7 ± 2
M1 - 陽極 × DLPFC - シヤム	2 ± 1	3 ± 1	4 ± 1	5 ± 2	6 ± 2	7 ± 2
M1 - シヤム × DLPFC - シヤム	2 ± 1	3 ± 1	4 ± 1	5 ± 2	6 ± 1	7 ± 2

M1、一次運動野；DLPFC、左背外側前頭前野；RPE、主観的運動強度；NRS、下肢に生じる痛みの数値的評価尺度；平均値±標準偏差

疲労困憊ペダリング課題の開始から6分後までの心拍数とRPE、NRSについては、表1にまとめた。疲労困憊ペダリング課題実施中の心拍数とRPE、NRSについて、刺激条件×運動時間の交互作用は認められなかった（心拍数、 $F_{(10, 70)} = 1.024$ 、 $p=0.433$ ；RPE、 $F_{(10, 70)} = 0.869$ 、 $p=0.566$ ；NRS、 $F_{(10, 70)} = 0.815$ 、 $p=0.615$ 、表1）。運動時間の主効果については、心拍数とRPE、NRSにおいて有意な主効果が認められた（心拍数、

$F_{(5, 35)} = 402.208$ 、 $p<0.001$ ；RPE、 $F_{(5, 35)} = 90.634$ 、 $p<0.001$ ；NRS、 $F_{(5, 35)} = 46.993$ 、 $p<0.001$ 、表1）。一方で、刺激条件の主効果は認められなかった（心拍数、 $F_{(2, 14)} = 1.265$ 、 $p=0.313$ ；RPE、 $F_{(2, 14)} = 0.566$ 、 $p=0.580$ ；NRS、 $F_{(2, 14)} = 0.707$ 、 $p=0.510$ 、表1）。



#### IV. 考察

我々は、一次運動野単独への陽極刺激よりも一次運動野と左背外側前頭前野の二カ所同時刺激の方が持久的運動能力の向上が期待できると予想していたが、本研究の結果においては、一次運動野と左背外側前頭前野の二カ所同時刺激で自転車ペダリングのTTEが有意に増大することはなかった。また、一次運動野単独への陽極刺激が自転車ペダリングのTTEを増大させるという先行研究の結果 [9、10] も再現することができなかった。

本研究の結果はネガティブなものであったが、近年では、tDCSが運動能力に与える影響を調査した研究では、効果が確認できないネガティブな報告も多くなってきた [14、15、17、21]。一般的に、ネガティブデータについては、出版バイアスによる影響を受けやすいが、今後、tDCSの刺激効果の検証や長期的な安全性について議論していくためには、ポジティブデータとネガティブデータを整理しながら慎重に議論していく必要がある。従って、以下には本研究の結果がネガティブデータとなった理由について、(1) 天井効果について、(2) 研究対象母集団の属性について、(3) tDCSへの応答の個人差について、(4) 運動課題に内在するパフォーマンス誤差について順に考察していく。

##### 1. 天井効果について

一次運動野単独への陽極刺激または一次運動野と左背外側前頭前野の二カ所同時刺激で自転車ペダリングのTTEが増大しなかったことについては、天井効果が影響した可能性が考えられる。Kanら [14] は、一次運動野への陽極刺激が疲労による運動パフォーマンスの低下を抑制するという先行研究 [8] の追試験を実施したが、その効果は再現できなかった。Kanら [14] はこの結果について、筋機能が最大化されている状況で、随意活動の更なる増大が発現しないのは皮質脊髄レベルの天井効果であると推測した。本研究においても、このような皮質脊髄レベルの天井効果によって、持久的運動能力の増

大が確認できなかった可能性がある。

##### 2. 研究対象母集団の属性について

本研究における研究対象者は高強度のパワー発揮が求められるアスリートであった一方で、一次運動野への陽極刺激で自転車ペダリングのTTEの増大が確認されている研究の対象者は非アスリートであった [9、10]。実際に、週に4回以上、1～2時間のトレーニングを行うレクリエーションランナーを対象とした研究 [21] では、一次運動野への2.0 mAで20分間の陽極刺激がランニングのTTEを向上させることはなかった。また、36名のアスリート（サイクリストまたはトライアスリート）を対象とした研究 [17] では、左背外側前頭前野への2.0 mAで20分間の陽極刺激によって、自転車ペダリングのタイムトライアル中のペダリングパワーが向上することはなかった。従って、本研究では研究対象者がアスリートであったために、本研究で用いた刺激パラメータでは、アスリートの持久的運動能力を増大させることが出来なかった可能性も推測される。このような運動経験によるtDCSの刺激効果の差異は、長期的な運動学習による脳の構造・機能の変化 [23] が影響している可能性もある。さらに、研究対象者は日常的に疲労困憊に達する程度のトレーニングを行っていることから、疲労困憊時が生理的限界に限りなく近い状態であった可能性も考えられる。以上のことから、アスリートに対するtDCSの効果を検証する場合、アスリートと非アスリート、またアスリートでもその競技の特異性によって、tDCSの刺激効果を分離して調査する必要がある。

##### 3. tDCSへの応答の個人差について

本研究で用いた刺激パラメータでは、自転車ペダリングのTTEの増大だけではなく、課題中の心拍数やRPE、NRS、課題後のピーク血中乳酸濃度についても、研究対象者間で一貫した刺激効果が観られなかった。このように研究対象者間で生じる刺激効果の差異は、tDCSへの応答の個人差が影響している可能性が考えられる。

本研究では、一次運動野単独への陽極刺激で持久的運動能力が向上したのは5名、反対に低下したのは3名であった。一次運動野へのtDCSが運動誘発電位の振幅に与える影響を評価した研究[24]では、陽極刺激で振幅が増大、陰極刺激で振幅が減少した研究対象者は全体の36%に留まった。一方で、陽極刺激で振幅が減少、陰極刺激で振幅が増大したのは21%、両刺激で振幅が増大したのは38%、両刺激で振幅が減少したのは5%であった[24]。すなわち、tDCSによる一次運動野の興奮性の変化レベルにおいても、刺激効果に個人差があることを示している。このようなtDCSへの応答の個人差について検証するためには、サンプルサイズを増やした研究や同じ刺激パラメータでの実験セッションを反復する研究が必要となる。

#### 4. 運動課題に内在するパフォーマンス誤差について

本研究の限界として、疲労困憊課題によるTTEの測定値の変動性や実験セッションの反復による日間変動は避けられない。特に、TTEの測定値は、少なくとも10%の変動性を有している[25]。今回のtDCSの刺激パラメータでは、刺激効果がその変動の中に隠れてしまった可能性も考えられる。そのため、スポーツパフォーマンスへの効果を検証するのであれば、より効果の高い刺激パラメータを探索していく必要がある。また、より測定誤差の小さいタイムトライアルや生理的指標に対する刺激効果を検証することが推奨される。また、3日間の実験セッションを反復することによるトレーニング効果や疲労効果が生じた可能性も否定できない。この可能性については、研究対象者がアスリートであったことや、日間変動に統計的な差が認められなかったことから、可能な限りその影響については除外できていると考えられるが、同じ刺激条件について反復して計測できていないため、この解釈については保留する。

## V. 結論

本研究では、アスリートを対象とした一次運動野と左背外側前頭前野の二カ所同時のtDCS刺激が自転車ペダリングのTTEを増大させることはなかった。tDCSがスポーツパフォーマンスを向上させるかどうかという問いについては、天井効果、研究対象母集団の属性、tDCSへの応答の個人差、運動課題に内在するパフォーマンス誤差など様々な要因を考慮して、効果のある刺激パラメータを探索していく必要がある。また、同時に、倫理的な議論を進めていくことも必要であろう。

## VI. 謝辞

本研究は、2019年度中京大学体育研究所、中京大学戦略的研究事業、科学研究費補助金(19J20371)の助成を受けて行われた。

## 引用文献

- [1] M. A. Nitsche and W. Paulus, "Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation," *J Physiol*, vol. 527 Pt 3, pp. 633-9, Sep 15 2000.
- [2] A. Priori, A. Berardelli, S. Rona, N. Accornero, and M. Manfredi, "Polarization of the human motor cortex through the scalp," *Neuroreport*, vol. 9, no. 10, pp. 2257-2260, Jul 13 1998.
- [3] L. S. Colzato, M. A. Nitsche, and A. Kibele, "Noninvasive Brain Stimulation and Neural Entrainment Enhance Athletic Performance—a Review," *Journal of Cognitive Enhancement*, vol. 1, no. 1, pp. 73-79, 2016.
- [4] D. J. Edwards *et al.*, "Transcranial Direct Current Stimulation and Sports Performance," *Front Hum Neurosci*, vol. 11, p. 243, 2017.
- [5] L. Angius, J. Hopker, and A. R. Mauger, "The Ergogenic Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Exercise Performance," *Front Physiol*, vol. 8, p. 90, 2017.
- [6] S. Reardon, "'Brain doping' may improve

- athletes' performance," *Nature*, vol. 531, no. 7594, pp. 283-4, Mar 17 2016.
- [ 7 ] S. Tanaka, T. Hanakawa, M. Honda, and K. Watanabe, "Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation," *Exp Brain Res*, vol. 196, no. 3, pp. 459-65, Jul 2009.
- [ 8 ] F. Cogiamanian, S. Marceglia, G. Ardolino, S. Barbieri, and A. Priori, "Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas," *Eur J Neurosci*, vol. 26, no. 1, pp. 242-9, Jul 2007.
- [ 9 ] M. Vitor-Costa et al., "Improving Cycling Performance: Transcranial Direct Current Stimulation Increases Time to Exhaustion in Cycling," *PLoS One*, vol. 10, no. 12, p. e0144916, 2015.
- [10] L. Angius, A. R. Mauger, J. Hopker, A. Pascual-Leone, E. Santarnecchi, and S. M. Marcora, "Bilateral extracephalic transcranial direct current stimulation improves endurance performance in healthy individuals," *Brain Stimul*, vol. 11, no. 1, pp. 108-117, Jan - Feb 2018.
- [11] L. Angius, B. Pageaux, J. Hopker, S. M. Marcora, and A. R. Mauger, "Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors," *Neuroscience*, vol. 339, pp. 363-375, Dec 17 2016.
- [12] E. Lattari et al., "Can transcranial direct current stimulation improve muscle power in individuals with advanced resistance training experience?," *J Strength Cond Res*, Apr 15 2017.
- [13] E. Lattari, B. S. de Oliveira, B. R. R. Oliveira, R. C. de Mello Pedreiro, S. Machado, and G. A. M. Neto, "Effects of transcranial direct current stimulation on time limit and ratings of perceived exertion in physically active women," *Neurosci Lett*, vol. 662, pp. 12-16, Jan 1 2018.
- [14] B. Kan, J. E. Dundas, and K. Nosaka, "Effect of transcranial direct current stimulation on elbow flexor maximal voluntary isometric strength and endurance," *Appl Physiol Nutr Metab*, vol. 38, no. 7, pp. 734-9, Jul 2013.
- [15] R. Montenegro et al., "Motor cortex tDCS does not improve strength performance in healthy subjects," *Motriz: Revista de Educação Física*, vol. 21, no. 2, pp. 185-193, 2015.
- [16] M. J. Barwood et al., "The Effects of Direct Current Stimulation on Exercise Performance, Pacing and Perception in Temperate and Hot Environments," *Brain Stimul*, vol. 9, no. 6, pp. 842-849, Nov - Dec 2016.
- [17] D. Holgado, T. Zandonai, L. F. Ciria, M. Zabala, J. Hopker, and D. Sanabria, "Transcranial direct current stimulation (tDCS) over the left prefrontal cortex does not affect time-trial self-paced cycling performance: Evidence from oscillatory brain activity and power output," *PLoS One*, vol. 14, no. 2, p. e0210873, 2019.
- [18] I. Laakso, S. Tanaka, S. Koyama, V. De Santis, and A. Hirata, "Inter-subject Variability in Electric Fields of Motor Cortical tDCS," *Brain Stimul*, vol. 8, no. 5, pp. 906-13, Sep-Oct 2015.
- [19] T. Mizuno and Y. Aramaki, "Cathodal transcranial direct current stimulation over the Cz increases joint flexibility," *Neurosci Res*, vol. 114, pp. 55-61, Jan 2017.
- [20] L. Angius, E. Santarnecchi, A. Pascual-Leone, and S. M. Marcora, "Transcranial Direct Current Stimulation over the Left Dorsolateral Prefrontal Cortex Improves Inhibitory Control and Endurance Performance in Healthy Individuals," *Neuroscience*, vol. 419, pp. 34-45, Sep 5 2019.
- [21] C. Baldari et al., "Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Psychophysiological Responses to Maximal Incremental Exercise Test in Recreational Endurance Runners," *Front Psychol*, vol. 9, p. 1867, 2018.
- [22] B. Vaseghi, M. Zoghi, and S. Jaberzadeh,



- "The effects of anodal-tDCS on corticospinal excitability enhancement and its after-effects: conventional vs. unihemispheric concurrent dual-site stimulation," *Front Hum Neurosci*, vol. 9, p. 533, 2015.
- [23] E. Dayan and L. G. Cohen, "Neuroplasticity subserving motor skill learning," *Neuron*, vol. 72, no. 3, pp. 443-54, Nov 3 2011.
- [24] S. Wiethoff, M. Hamada, and J. C. Rothwell, "Variability in response to transcranial direct current stimulation of the motor cortex," *Brain Stimul*, vol. 7, no. 3, pp. 468-75, May-Jun 2014.
- [25] K. Currell and A. E. Jeukendrup, "Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance," *Sports Med*, vol. 38, no. 4, pp. 297-316, 2008.